



軌道上データを用いたCALET検出器のMIP較正

赤池陽水¹, 鳥居祥二^{1,2}, 笠原克昌², 浅岡陽一², 小澤俊介¹, 小宮優馬¹, 田村忠久³, 清水雄輝³, 他CALETチーム
早大先進理工¹, 早大理工研², 神奈川大³

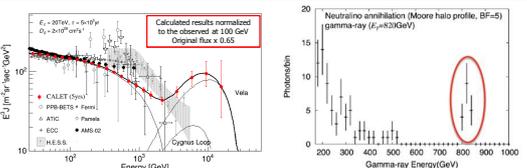


CALETは2015年8月に国際宇宙ステーションに設置した宇宙線観測装置であり、高エネルギーの電子、ガンマ線、陽子・原子核成分の高精度観測に向け、10月初旬より初期運用を開始している。CALETの主検出器は、30放射線の厚い物質をもつカロリメータであり、電子観測において3%以下の高いエネルギー分解能と、 10^5 の電子陽子識別性能を發揮する。軌道上における検出器のエネルギー較正は、軌道上で取得する陽子やヘリウムといった宇宙線の最小電離損失粒子(MIP)を利用する。これにより、シンチレータ発光量の位置依存性や温度依存性といった個々の検出器特性を詳細に較正でき、また長期観測における検出器の健全性を常時確認することが可能である。本発表では、CALETにおいて、エネルギー較正の基準となるこのMIP較正について報告する。

CALET: CALorimetric Electron Telescope

- ✓ 2015年8月 国際宇宙ステーション「きぼう」に搭載
- ✓ 2015年10月 初期運用開始
- ✓ 2015年12月 定常運用開始(観測期間:2年(目標5年))

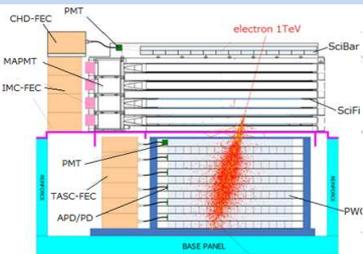
観測目的	観測対象
宇宙線近傍加速源の特定	TeV領域における電子エネルギースペクトル
暗黒物質の探索	電子・ガンマ線の100 GeV-10 TeV領域におけるスペクトルの“異常”
宇宙線の起源と加速機構の解明	電子(1 GeV ~ 20 TeV)及び陽子・原子核(数十 GeV ~ 1000 TeV)の精密なエネルギースペクトル、超重核のフラックス(cutoff-rigidity以上)
宇宙線銀河内伝播過程の解明	二次核/一次核(B/C)比のエネルギー依存性
太陽磁圏環境の研究	低エネルギー(<10GeV)電子フラックスの長・短期変動
ガンマ線バーストの研究	7 keV ~ 20 MeV領域でのX線・ガンマ線のバースト現象



Calorimeter の概要

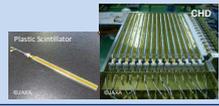
CALET検出器の特徴

- 30放射線の物質をもつ解像型カロリメータ
- 高エネルギー分解能 < 3% (>100 GeV)
- 強力な粒子識別性能
 - 陽子除去性能 $\sim 10^5$ @ TeV
- ⇒ TeV領域の高精度な宇宙線・ガンマ線観測が可能



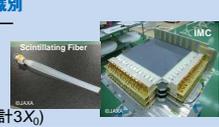
■ CHD: CHarge Detector

- 電荷測定
- プラスチックシンチレータ (32mm × 10mm × 448mm)
- 14本 × 1層(X,Y)
- 読出し: PMT



■ IMC: IMaging Calorimeter

- 到来方向、入射位置、粒子識別
- シンチレーティングファイバー (1mm × 1mm × 448mm)
- 448本 × 8層(X,Y)
- 読出し: 64ch MAPMT
- タングステン板
- 0.2X₀ × 5枚 + 1X₀ × 2枚 (合計3X₀)



■ TASC: Total Absorption Calorimeter

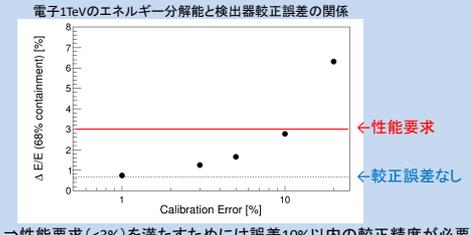
- 粒子識別、エネルギー測定
- PW (20mm × 19mm × 326mm)
- 16本 × 6層(X,Y) (合計27X₀)
- 読出し: (X1) PMT (Y1-Y6) APD/PD



最小電離損失粒子による検出器較正

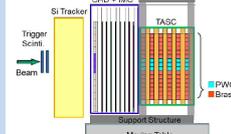
各検出器からの信号は、最小電離損失粒子(MIP)による信号を基準として絶対値を較正する。最小電離損失とは、相対論的速度を持つ荷電粒子の電離損失によるエネルギー損失量である(厳密にはその最小値)

陽子の電離損失のエネルギー依存性



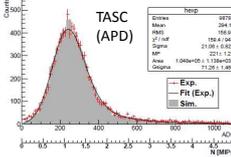
加速器実験におけるMIP較正精度検証

- 使用装置: CALET熱構造モデル (フライトモデルと同じ構造)
- 照射ビーム:
 - ・ ミューオン: 150, 180 GeV/c
 - ・ 電子: 10 ~ 290 GeV/c
 - ・ 陽子: 30 ~ 400 GeV/c



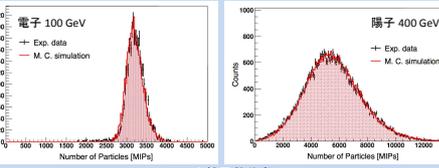
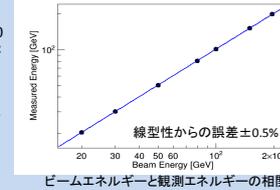
■ ミューオンによるエネルギー較正

- ミューオンのMIP粒子を利用してADC値を粒子数に換算
- 実験によるADC分布を右図のようにフィッティングし、Landau成分の最頻値をMIPと定義
- シミュレーション(EPICs)で得られるエネルギー損失も同様に粒子数に換算
- ⇒ 実験データとシミュレーションのシャワーエネルギーを、粒子数で比較・検証が可能



■ 観測エネルギーの直線性とシミュレーションとの比較

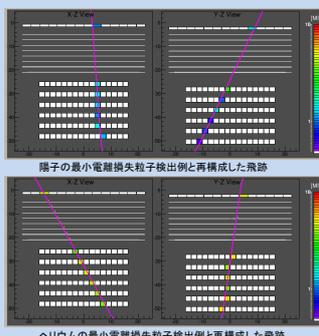
- エネルギー線性が200 GeVまで±0.5%で保持されることを確認
- 検出器シミュレーションが電子・陽子のシャワー粒子の観測応答を再現することを確認



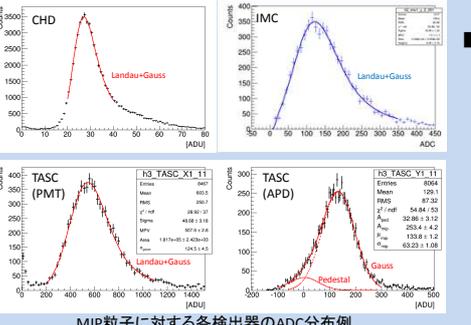
ISS軌道上におけるMIP較正

■ 宇宙線の最小電離損失(MIP)粒子を利用した検出器較正

- シングルトリガーで収集したイベントから、陽子・ヘリウムのMIP粒子を選択し、検出器較正を実施する
- MIP粒子の選別とシグナル最頻値導出の解析手順
 1. IMCの粒子数、ヒットチャンネル数でシャワーイベントを除去
 2. 宇宙線の飛跡を再構成し、粒子が通過したチャンネルを選別(右図は再構成した飛跡の検出例)
 3. 通過距離に応じて、イベント毎にシグナル値を垂直入射相当に補正
 4. ADC分布をフィッティングし最頻値を導出(下図はMIP-fitの例)

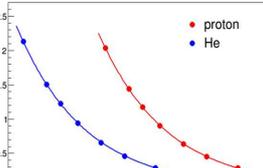


- 飛跡再構成の手法
 1. IMCにおける各層最大信号のチャンネルを選別
 2. 上記の候補点を最小二乗法でフィッティング
 - ・ もし二乗和が2を超える場合は、最難点を除外し再フィッティング
 - ・ 候補点が4点に満たない場合はイベントを破棄



■ イベント取得レートと較正精度

- 検出器較正に利用するイベント数
 - ・ 陽子: ~6400 events / orbit (90min.)
 - ・ ヘリウム: ~1300 events / orbit (90min.)
- ヘリウムは陽子に比べ4倍大きいシグナル値でエネルギー較正が可能である



観測環境に応じたMIP較正

各チャンネルの信号応答について、入射位置や観測温度、観測緯度等の観測条件を補正し、常時このシグナル値をモニタすることで、高精度なエネルギー較正を行う

■ シグナル値の位置依存性

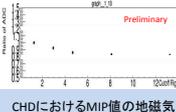
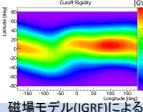
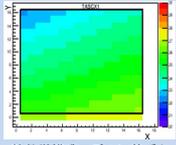
宇宙線の通過位置により、シンチレータの減衰長に応じたシグナルの位置依存性が存在するが、MIP粒子を詳細に解析することにより補正が可能

■ シグナル値の温度依存性

TASCで用いているPWのシグナルは温度に依存する(~3%/C)が、最小電離損失粒子のシグナルをモニタすることで補正が可能

■ 緯度依存性を利用した較正精度の向上

磁場の遮蔽効果の影響から、MIP較正に利用する粒子の平均エネルギーは地磁気緯度に依存する。地磁気緯度ごとのMIP較正により、詳細な検証・補正が可能



まとめ

- CALETでは、軌道上で収集する陽子やヘリウムを利用して、実際の測定する宇宙線データを基に検出器のエネルギー較正を行う
- 最小電離損失粒子を利用した較正精度は加速器実験で検証を行っており、シミュレーション計算による良い再現性を確認している
- 現在、収集データの詳細な解析を行っており、実際の観測環境に応じたエネルギー較正を実施している
- 較正用データは定期的に収集しており、長期間の観測による高統計・高精度な宇宙線観測の実現に向けて詳細なデータ解析を実施している